미래형 식육 냉동 기술 개발을 위한 초고압 가공 기술의 활용

Application of High-pressure Processing for Developing Novel Meat Freezing Technology

홍근표 (Geun-Pyo Hong)

세종대학교 식품생명공학과
Department of Food Science and Biotechnology, Sejong University

I. 서론

식육은 인체에 가장 유용한 영양소와 에너지를 제공하는 식품 원료이며, 농산물에 비하여 여전히 가격이 높은 식품 원료이다. 반면, 식육은 미생물의 증식, 지질 산화, 효소의 작용 등에 의하여 저장 중 쉽게 이화학적 특성이 변하며, 부패하기 쉽다. 따라서 식육의 장기 보존을 위하여 냉동 처리 기술의 활용이 필수적이다.

저장 기술 측면에서 냉동은 수분활성도를 낮추며, 저온을 유지하기 때문에 저장 과정 중 화학 반응 속도를 낮추며, 미생물의 증식을 억제한다. 반면, 얼음은 물보다 밀도가 낮기 때문에 얼음 결정의 부패 팽창은 식육의 조직 손상을 초래하며, 이는 해동 과정 중 다량의 드립 발생이 원인이 된다. 이러한 드립의 발생은 식육의 품질 저하의 원인이 될 뿐만 아니라, 냉동 식육 산업에서 막대한 금전적 손실을 야기하기 때문에 이를 최소화 시키기 위한 기술적 개발이 요구된다. 일반적으로 냉동 식육의 품질은 재료, 냉동, 저장/유통, 해동의 4요소에 의해 결정되며, 이중 한 가지 요소가 불충분할 경우 품질을 보존하기 어렵다. 과거에는 식육의 냉동을 느리게 하는 경우, 느린 해동을 통해 드립 발생을 낮출 수 있다는 주장이 제기되었지만, 단백질의 변성에 의한 보수력 저하와 해동 드립의 빠른 조직 흡수 속도를 감안할 때, 완만 냉동을 통한 조직 손상은 해동과정으로 복원할 수 없으며, 이에 따라 대부분의 문헌들은 식육의 급속 냉동이 바람직하다고 보고하고 있다(Gambuteanu et al., 2013). 결국, 냉동 조건은 이후 연계되는 저장 및 해동 중 식육의 품질 변화를 결정하는 중요한 지표이기 때문에 가장 중요한 요인이라고 볼 수 있다.

현재 냉동 식육 산업에서 사용하고 있는 냉동기술은 송풍식 강제대류 시스템에 국한되어 있는 실정이다. 가정대체식 등 편이 식품에 사용되는 작은 식육 원료의 냉동은 개별급속냉동(individual quick freezing, IQF)에 의해 빠른 냉동이 가능한 반면, IQF 기술도 송풍식 냉동 기술에 기반하기 때문에 식육의 크기에 따라 효과는 제한적이다. 이를

*Corresponding author: Geun-Pyo Hong
Department of Food Science and Biotechnology, Sejong University,
Seoul 05006, Korea
Tel: +82-2-3408-2914
Fax: +82-2-3408-4319
Email: gphong@sejong.ac.kr

극복하기 위하여 새로운 냉동기술의 개발이 다수의 연구자들에 의해 수행되고 있다. 특히 이들 연구는 크게 심온 냉동 기술과 과냉각 현상의 제어 기술 개발 측면으로 집중되고 있다(그림 1).

특히 과냉각 현상의 제어는 향후 식육의 저온 저장 기술 개발 측면에서 다양하게 응용이 가능하다. 하지만 식육 과냉각 현상의 제어는 여전히 쉽게 달성하기 어렵고, 따라서 본 글에서는 가장 효과적인 과냉각 현상의 제어 기술인 초고압 냉동 기술의 원리와 효과를 분석하고, 향후 개선되어야 할 기술적 개발 측면을 살펴보고자 하였다.

II. 본론

1. 과냉각 현상 제어의 필요성

냉동 과정은 식육으로부터 열을 냉동고 내부의 찬 공기로 전달하는 과정이다. 따라서 식육은 표면부터 동결되기 시작하며, 중심부가 동결되는 시점을 냉동의 종료로 간주할 수 있다. 가열 측면에서는 전자기선의 적용을 통해 가열 대상체의 내부에서 열을 발생시킬 수 있지만, 냉동 과정에서는 대상체의 중심에서 열을 방출시킬 수 있는 수단이 없기 때문에 급속 냉동을 위하여 대상체 중심부의 열을 빠르게 표면으로 이동시켜야 한다. 동결 표면에서는 수분이 얼음으로 전환되어 있기 때문에 열의 이동이 수월한 반면, 식육 내부의 열은 수분 층을 통해 동결 표면으로 이동해야 하기 때문에 냉동 속도는 식육의 표면과 중심부 간에 차이를 보일 수밖에 없으며, 식육의 크기가 클수록 온도 차이는 현저하게 나타난다.

과냉각 현상이란 물이 빙점 이하에서도 얼지 않는 현상으로, 이는 빙핵 형성 과정이 시간 의존적임을 의미한다. 순수한 물의 경우, 빙핵은 물분자들이 규칙적인 배열을 하여 성장할 수 있는 임계 크기를 초과하였을 때 얼음 결정으로 성장할 수 있으며, 이 과정은 290 ns가 소요된다고 보고되었다(Matsumoto et al., 2002). 반면, 빙핵이 임계 크기에 도달하기 전 물은 계속해서 냉각되어 얼지 않는 과냉각 현상이 발생한다. 식육은 구성 성분이 매우 다양하며, 빙핵의 역할을 할 수 있는 다양한 요인이 존재하기 때문에 보편적으로 냉동 과정 중 과냉각 현상이 관찰되지 않거나 혹은 과냉각 크기가 매우 작다(Kim and Hong, 2016).

냉동 과정은 크게 예비 냉각 과정(빙핵 형성 전단계), 상 변화 과정(물이 얼음으로 전환) 및 사후 냉각 과정(얼음의 품온 저하)으로 분류되며, 식육 냉동 과정은 상 변화 과정이 대부분을 차지한다(그림 2). 따라서 냉동 속도는 상 변화 과정에 소요된 시간으로 결정되며, 상 변화 과정에서는 대부분의 물이 얼음으로 전환되기 때문에 식육의 품질이 결정되는 단계이다. 하지만, 근본적으로 상 변화 시간은 과냉각의 크기에 의해 영향을 받게 된다.

과냉각의 크기는 빙점과 빙핵 형성 온도 간의 차이로 정의되며, 식육에 빙핵이 형성되면, 식육의 온도는 초기 빙점으로 상승하게 된다. 이 과정에서는 물이 얼음으로 변화되는 과정으로 80 kcal/kg의 융해 잠열이 배출된다. 따라서 과냉각의 크기가 크면 효과적으로 융해 잠열이 배출되어 많은 수의 빙핵이 형성되며, 상 변화 시

그림 1. 냉동 방법에 따른 냉동 속도의 상대적 비교

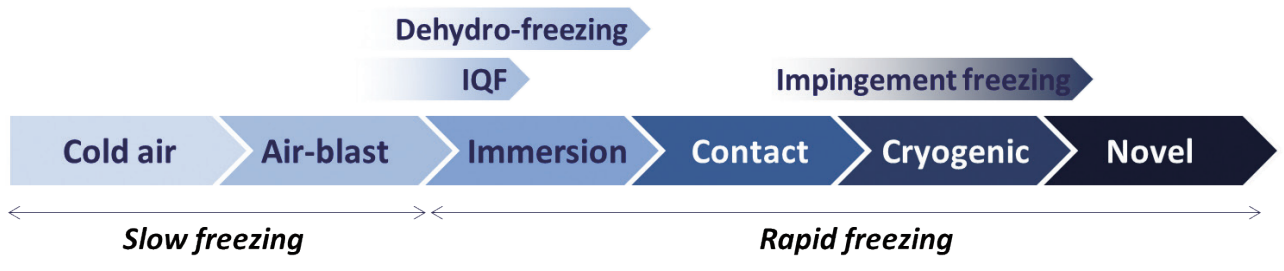
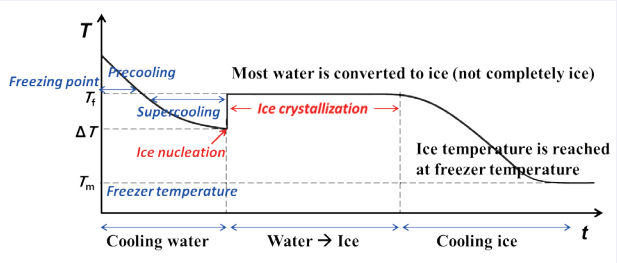


그림 2. 순수한 물의 냉동 곡선



간을 단축시키기 때문에 형성되는 얼음 결정의 크기가 매우 작다(Kim and Hong, 2016). 결국 과냉각 현상은 식육의 급속 냉동 효과의 부여뿐 아니라, 조직 손상으로 야기되는 품질 저하를 최소화 시키는 중요한 냉동 조건이다.

과거에는 과냉각 현상의 제어가 기술적으로 어려웠기 때문에 냉동 속도 향상을 위하여 식품의 형태, 크기, 포장 재질 및 방법, 냉동고 온도, 냉동고 유속 등의 인자를 활용하였지만, 최근에는 압력에 의한 얼음의 빙점 강하 원리를 활용한 초고압 냉동 기술이 소개되어 가장 빠른 냉동 기술로 평가를 받고 있다. 특히, 초고압 처리 기술은 식육에 적용하기에 매우 유용한 기술로 평가받고 있기에, 가장 실제 산업계에 적용되는 가장 성공적인 신가공 기술로 주목을 받고 있다.

2. 초고압 가공 기술의 효과

초고압 가공 기술은 식품의 비가열 살균 기술로 활용되고 있다. 일반적으로 상업적 살균의 효과를 얻기 위한 임계 압력 수준을 600 MPa 내외로 간주하고 있으며, 포장이 완료된 육가공 제품에 적용이 가능하여 제조 공정 중 오염을 최소화할 수 있는 장점이 있다. 하지만, 단백질의 변성이나 지질의 결정화를 초래하며, 그 결과 최종 제품의 조직감을 변형시킬 수 있다. 일부 제품에서는 초고압 처리에 의해 변형된 조직감이 긍정적으로 작용하는 경우도 있지만, 기존 열처리 제품과의 차이로 인해 이를 부정적으로 인식할 수 있어 주의가 필요하다.

반면, 초고압 가공 기술은 살균 이외에 식육의 이화학적 특성의 변화에도 영향을 미치며, 이를 통하여 다양한 육가공 제품의 품질 향상 측면에서 활용할 수 있다. 특히, 상대적으로 낮은 압력 수준인 100–200 MPa의 초고압 처리는 단백질의 구조적인 변화를 초래하지만, 이는 열처리와는 상이한 형태로 변화하기 때문에 식육의 가공 적성 향상에 기여할 수 있다. 이에 따라 식육의 초고압 처리는 새로운 가공 기술로 활용이 가능하다.

초고압 처리에 의한 식육 단백질의 구조적인 변화는 식육의 보수력 향상을 수반하며, 이는 저장 기간 중에서 안정적으로 유지되는 특성이 있다. 반면, 향상된 보수력은 제한된 압력 범위에서 관찰되는 특성이며, 이후 압력 수준을 증가시킴에 따라 감소하게 된다. 이러한 현상은 압력에 따른 단백질의 변성 기작이 열처리와 상이하기 때문인 것으로 보고되고 있다. 단백질은 표면부에 친수성 그룹이 배치되고, 소수성 그룹은 사슬 내부로 위치하는 경향이 강하며, 그 결과 단백질 내부에는 빈 공간(cavities)이 존재한다. 압력이 증가하면(50~100 MPa) 단백질 외부의 물분자들의 영향으로 다당체(oligomer)가 단량체(monomer)로 해리된다. 이 과정에서 표면으로 노출되는 소수성 그룹의 표면은 물분자들에 의해 둘러 쌓이며, 이는 식육 단백질의 수화력 증가를 발생시킨다(Boonyaratanakornkit et al., 2002). 이러한 과정에서 압력 수준을 다소 증가시키면(~200 MPa) 식육 단백질은 3차원 네트워크를 형성하여(gelation) 저장 기간 중에도 보수력을 안정적으로 유지시킨다. 반면, 압력수준을 지나치게 증가시키는 경우(>300 MPa) 단백질 구조 내부 공간의 붕괴에 따른 비가역적 변성이 일어나며, 그 결과 보수력의 소실 및 가열 이후와 유사한 이화학적 특성을 보인다. 또한 초고압 처리에 의한 단백질 젤형성은 식육 입자 간의 결착력을 부여하며, 그 결과 비가열 재구성 육제품의 제조 기술로 활용이 가능하다(그림 3).

반면, 식육 입자는 표면의 염용성 단백질 용출이 이루어지지 않아 200 MPa 수준의 압력만으로는 단백질의 충분한 젤화가 발생하기 어렵다. 이 경우 저농도의 소금(0.5% 내외)과 부가적으로 카라기난(carrageenan) 등의 결착제를 사용하는 경우 결착제와 식육단백질 간의

그림 3. 초고압 처리(200 MPa)와 열처리(75℃)에 의한 재구성의 비교

네트워크 형성으로 우수한 결착력이 발생한다(Hong et al., 2008). 초고압 처리를 식육에 사용하는 경우 발생하는 대표적인 문제점은 변색의 발생이다. 기존 문헌들에 따르면 200–350 MPa 내외의 초고압 처리는 globin의 변성을 초래하여 선분홍색의 변색을 초래하며, 400 MPa 이상의 압력 수준에서는 myoglobin의 산화로 갈변하는 것으로 보고된다(Carlez et al., 1995). 반면에, 상대적으로 낮은 수준의 초고압 처리(100~150 MPa)에서는 식육의 metmyoglobin 환원 활성이 증가하며(Chun et al., 2014), 그 결과 육색의 저장 안정성을 크게 증가시킬 수 있음이 발견되고 있다(그림 4). 이는 산화 효소 활성이 환원 효소군에 비하여 압력에 민감하기 때문이며, 최근에는 초고압 처리를 가수분해 효소의 활성 강화 기술로 적용하고자 하는 시도들이 이루어지고 있다(Cheah and Ledward, 1997; Chun et al., 2014). 따라서 식육 처리를 위한 초고압 가공 기술은 그 목적에 따라 압력 수준을 선정해야 하며, 특히 상대적으로 낮은 압력 수준(200 MPa 이내)은 다양한 형태로 식육의 품질 특성을 향상시킬 수 있음이 분명하다.

3. 빙점의 압력 의존성과 초고압 냉동 기술

보편적으로 물질은 고체상이 액체상에 비하여 밀도가 높은 반면, 특이적으로 물은 얼음의 밀도가 물보다 낮다. 따라서 물질의 빙점은 압력에 비례하는 반면, 물은 압력이 증가함에 따라 빙점이 낮아지는 특성을 보인다. 실제로 물의 빙점은 210 MPa에서 −21℃까지 강하하며, 이후 압력을 증가시킴에 따라 다시 증가한다. 이러한 물의 빙점 변화를 사용하면 다양한 초고압 냉동 기술의 활용이 가능하다(그림 5).

가압 냉동(pressure-induced freezing, PIF)은 압력만을 활용하여 식육을 냉동시킬 수 있고, 냉동 장비가 요구되지 않지만, 이론적으로 상온에서 PIF 처리를 위하여 1 GPa(1,000 MPa) 이상의 높은 압력이 요구된다. 이는 식육의 품질 측면이나 기술적 측면에서 바람직하지 않다. 정압 냉동(pressure-assisted freezing, PAF)은 일정 압력 하에서 식육을 냉동하는 방법으로 압력 하에서 물의 잠열 저하에 기인하여 빠른 냉동이 가능하다. 반면, 일반적인 상압 냉동과 비교하였을 때, 동일한 냉동 온도를 적용하는 경우 식육의 빙점 강하는 냉동의 추진력으로 작용하는 빙점과 냉동 온도와의 차이가 감소하기 때문에 오히려 냉동 속도가 느려지는 문제점을 초래할 수 있다(그림 6). 따라서 PAF 기술도 식육의 냉동 기술로 활용하기에는 한계가 있다(Fernández et al., 2006).

따라서 가장 유용한 초고압 냉동 수단으로 압전이 냉동(pressure-shift freezing, PSF)에 대한 많은 연구

그림 4. 돈육 myoglobin의 저장 중 색도 변화

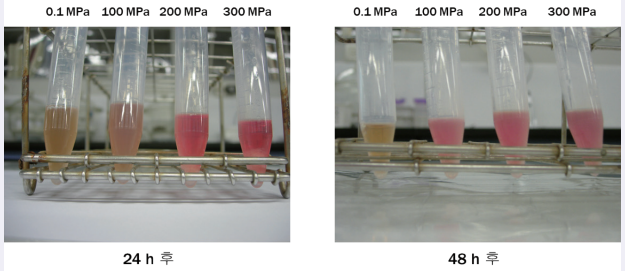


그림 5. 물의 상도해도와 초고압 냉동의 분류

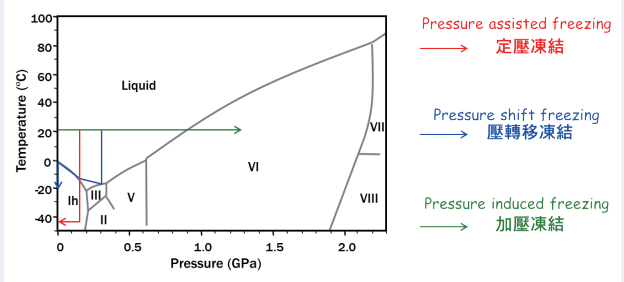
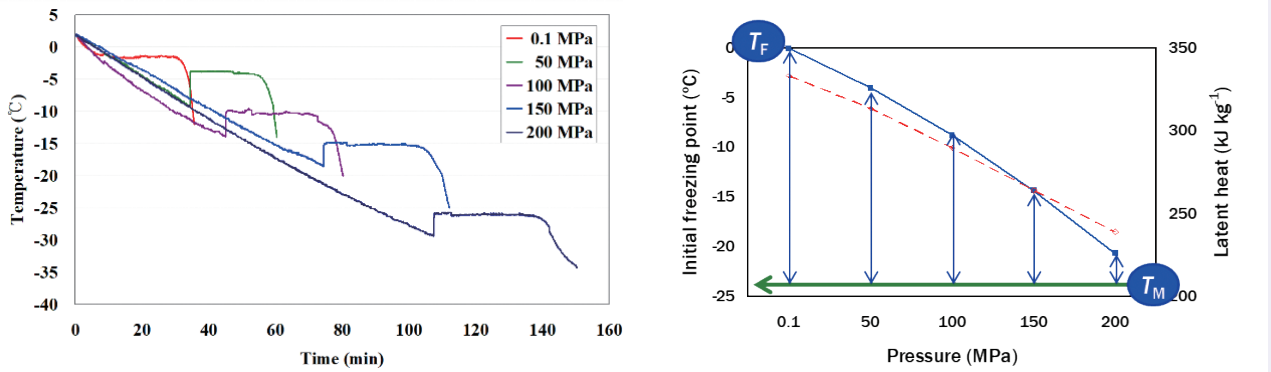


그림 6. 압력 수준에 따른 돈육의 빙점 및 냉동 곡선 변화(Hong 등, 2007)

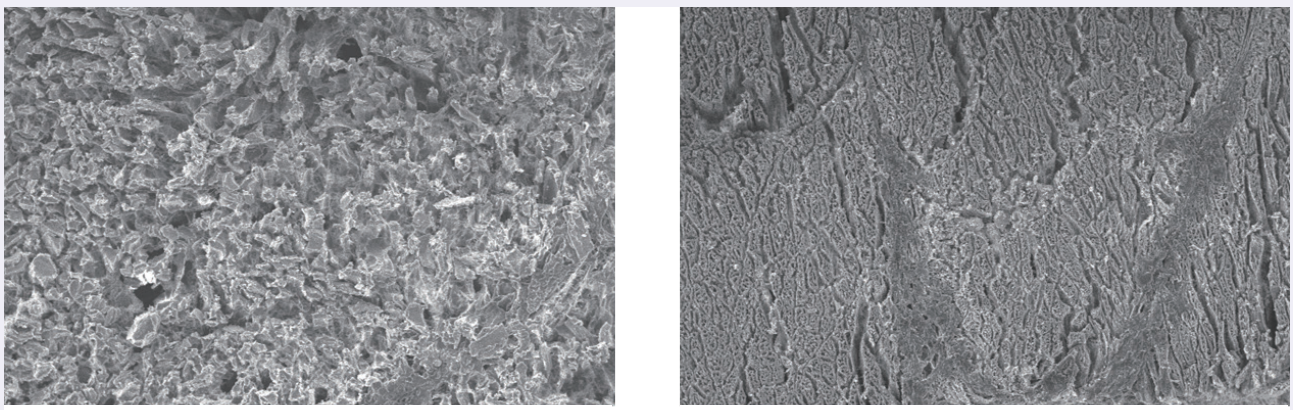


가 이루어졌다. PSF는 200 MPa 등의 압력 하에서 식육을 −20℃ 내외에서 과냉각 상태를 유지시킨 이후, 압력을 해제시켜 급속 냉동하는 방법이다. 따라서 압력을 활용하여 과냉각 현상을 인위적으로 제어할 수 있는 가장 보편적인 방법이며, 순간적인 감압 조건에서 −20℃의 과냉각을 유지하는 식육은 급격하게 잠열을 방출하며 얼기 때문에 식품의 크기나 기하학적 형태에 상관없이 순간적으로 냉동이 발생한다. PSF 처리에 의해 식육 내부에서 형성된 얼음 결정체는 매우 작기 때문에 식육의 조직 손상을 최소화할 수 있다(그림 7).

4. 상용화를 위한 초고압 냉동 기술의 한계

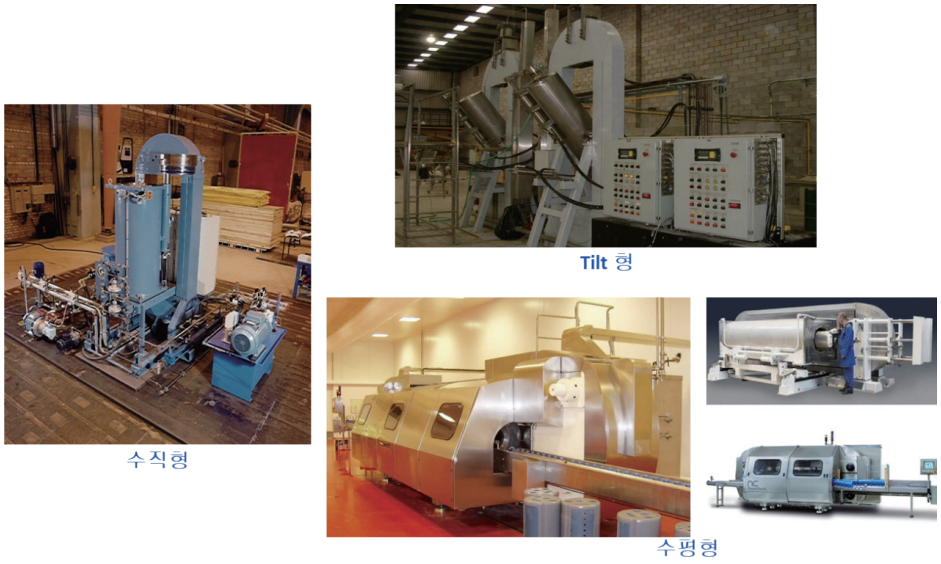
이론적으로 초고압 냉동(PSF)은 과냉각 현상을 인위적으로 제어하기 위한 수단으로 가장 우수한 방법이다. 하지만 냉동 식육 산업에서 PSF를 적용하기 위해서는 여전히 기술적 보완이 요구되고 있다. 최근 초고압 설비 생산 기술이 향상되어 상업적으로 사용하는 장비는 최대 600 L 규모의 수준이 이르고 있다(그림 8). 초고압 처리는 정수압을 활용하기 때문에 초고압 냉동을 위하여 600 L 규모의 냉매를 냉각시켜야 하며, 이 경우 냉각에 소요되는 시간이 지나치게 느리기 때문에 냉동 식육은 긴 시간을 초고압 환경에 노출된다. 따라서 저온 환경에서 압력에 의한 단백질 변성이 크게 발생하게 되며, 결국 냉동 식육의 품질은 매우 떨어지게 된다.

그림 7. 냉동 방법에 따른 돈육 등심의 미세 구조 비교



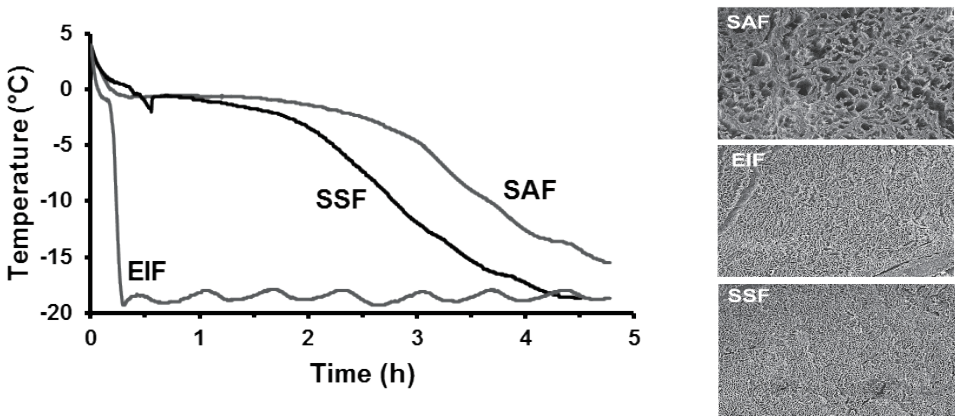
상압냉동 (−30℃)　　PSF at 200 MPa, −20℃

그림 8. 상업적으로 사용되는 초고압 가공 장비의 형태



또한 기존 초고압 가공 처리에서는 물을 압축 유체로 사용하지만, 초고압 냉동을 위해 유체를 부동액으로 사용해야 한다. 일반적으로 사용되는 부동액은 ethylene glycol, propylene glycol 또는 ethanol이 사용된다. 반면, 장시간 초고압 환경에 노출되는 식품의 포장 상태에 따라 일부 부동액의 내부 침투가 발생할 수 있으며, 이는 식품 안전성 측면에 문제가 될 수 있다. 특히 저온의 환경에 포장 식육이 노출되는 점을 고려할 때 포장 재질과 방법의 개선이 반드시 수반되어야 한다. 따라서 잠재적인 장점에도 불구하고, 현재 상업적으로 초고압 냉동 기술을 식육에 적용한 사례는 없고, 일부 고부가가치 생물 소재의 보존 측면에 초고압 냉동 기술이 제한적으로 사용되고 있는 실정이다. 이를 개선하기 위하여 초고압 처리와 유사한 기술인 전자기장의 활용을 위해 일본 Avi사에서 cell alive system을 보급하고 있지만, 이들의 효과는 여전히 검증되지 않고 있다(Otero et al., 2016). 최근에는 냉각 온도를 정밀하게 제어하여 돈육의 과냉각을 유도한 결과, 급속 냉동의 효과를 얻을 수 있음이 보고되었지만(그림 9), 과냉각 유도 단계와 사후 냉각 단계에 상이한 냉동 조건을 부여해야 하고, 식육의

그림 9. 과냉각 기반 냉동(SSF) 돈육의 냉동 속도 및 미세 구조(Kim과 Hong, 2016)



크기에 보편적인 적용이 가능한지에 대한 검증이 이루어지지 않은 한계가 있으며(Kim and Hong, 2016), 따라서 미래형 냉동 기술의 개발을 위하여 많은 연구가 요구되고 있다.

III. 결론

국내 식육 소비량은 매년 증가하고 있는 추세이며, 특히 고품질 식육에 대한 소비자 요구가 크게 높아지고 있음에 따라 냉동 기술에서도 기존 기술과는 차별화되는 미래형 냉동 기술의 개발이 요구되고 있다. 기존 냉동 기술에서는 냉동 온도와 공기 유속의 조절이 냉동 속도 향상을 위해 중요한 요인이었지만, 최근에는 과냉각 현상의 제어를 위한 다양한 연구들이 수행되고 있다. 일부 성공적인 연구 사례에도 불구하고, 미래형 냉동 기술을 산업적으로 적용하기 위해서는 여전히 기술 개발이 요구되고 있는 실정이다. 반면, 일본이나 미국에서는 이러한 미래형 냉동 기술에 대한 연구 및 산업화를 위한 노력이 진행되고 있는 반면, 국내에서는 새로운 냉동 기술 개발에 대한 시도가 거의 이루어지지 않고 있다. 국내 식생활 문화가 편리성을 추구하는 방향으로 변화함을 감안할 때 국내에서도 산학 기관이 연계하여 새로운 냉동 기술 개발에 대한 많은 연구를 실시해야 할 것이다.

사사

이 성과는 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(NRF-2017R1D-1A1B03031795)이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Boonyaratanakornkit BB, Park CB, Clark DS. 2002. Pressure effects on intra- and intermolecular interactions within proteins. Biochim Biophys A 1595:235-249.
2. Cambuteanu C, Borda D, Alexe P. 2013. The effect of freezing and thawing on technological properties of meat: Review. J Agroaliment Proc Technol 19:88-93.
3. Carlez A, Veciana-Nogues T, Cheftel JC. 1995. Changes in colour and myoglobin of minced beef meat due to high pressure processing. Lebensm Wiss Technol 28:528-538.
4. Cheah PB, Ledward DA. 1997. Inhibition of metmyoglobin formation in fresh beef by high pressure. Meat Sci 45:411-418.
5. Chun JY, Jo YJ, Min SG, Hong GP. 2014. Effect of high pressure on the porcine placental hydrolyzing activity of pepsin, trypsin and chymotrypsin. Korean J Food Sci Anim Resour 34:14-19.
6. Chun JY, Min SG, Hong GP. 2014. Effects of high-pressure treatments on the redox state of porcine myoglobin and color stability of pork during cold storage. Food Bioprocess Technol 7:588-597.
7. Fernández PP, Otero L, Guignon B, Sanz PD. 2006. High-pressure shift freezing versus high-pressure assisted freezing: Effects on the miscrostructure of a food model. Food Hydrocoll 20:510-522.

8. Hong GP, Ko SH, Choi MJ, Min SG. 2007. Effects of pressure assisted freezing on physicochemical properties of pork. Korean J Food Sci Anim Resour 27:190-196.
9. Hong GP, Min SG, Ko SH, Choi MJ. 2008. Effect of high pressure treatments combined with various levels of κ-carrageenan on cold-set binding in restructured pork. Int J Food Sci Technol 43:1484-1491.
10. Kim Y, Hong GP. 2016. Effects of artificial supercooling followed by slow freezing on the microstructure and qualities of pork loin. Korean J Food Sci Anim Resour 36:650-655.
11. Matsumoto M, Saito S, Ohmine I. 2002. Molecular dynamics simulation of the ice nucleation and growth process leading to water freezing. Nature 416:409-413.
12. Otero L, Rodriguez AC, Perez-Mateos M, Sanz PD. 2016. Effects of magnetic fields on freezing: Application to biological products. Compr Rev Food Sci Safety 15:646-667.